第１章　観測の概要

１．１　はじめに

地震は突発的に発生し，激甚な災害をもたらすことから，未然に地震の発生を予知して災害を軽減することは人々の切実な願望である．特に日本は，世界で発生する地震総数の約1割が発生する有数の地震多発国で，過去大きな地震災害を繰り返しており，地震予知の実現は国民の悲願とも言いえる状況となっている．

日本において，地震学の枠を一歩踏み出し，地震予知に向けた科学的な研究が体系的に進められるようになったのは，1962年，坪井忠二・和達清夫・萩原尊禮を中心とする「地震予知計画研究グループ」により地震予知のための観測計画について提案された『地震予知ー現状とその推進計画』（通称ブループリント）によるところが大きい（力武他,1980;力武,1986）．地震の実態が完全に解明されていない段階で予知を云々することには様々な批判もあったが，この計画により，組織的な地震予知研究が立ち上げられることになった．すなわち，1963年5月には測地学審議会に地震予知部会が設置され，1964年7月の第一次地震予知計画実施の建議がなされ，1965年4月には特別事業費として地震予知研究計画への国家支出が開始された．以後，建議に従い，地震予知の実現を目指し，測地，地殻変動連続観測，地震活動，地震波速度，活断層，地磁気･地電流，地下水，地球化学的手法等様々な項目での観測研究が鋭意実施されてきた．なお，測地学審議会ではその後8回にわたり関係省庁に建議を行っている．

1968年5月16日に発生した十勝沖地震（M=7.9）は北海道南部および東北地方に大きな被害をもたらした．これを契機に政府レベルで地震予知推進に関する動きが活発になり，「地震予知推進について」が閣議了承され，気象庁等関係機関と大学の密接な連携･協力の下に国家プロジェクトとして地震予知の研究開発に取り組む体制が整い，1969年4月には国土地理院に地震予知連絡会が設置され，地震予知に関する総合判断が行われるようになった．

このような流れの中で来るべき東海地震の発生の可能性に関する議論が進み，大規模地震特別措置法が制定され（1978年12月施行），1979年8月には東海地域を地震防災対策強化地域に指定，同時に気象庁内に地震防災対策強化地域判定会が発足した．これにより東海地震という特定の地震に限定したものではあるが，地震の監視・予知を国家業務として実施することとなり，以後，稠密な観測網と監視システム等の構築と改善が鋭意続けられている．

この間，1976年10月には閣議決定により内閣に地震予知推進本部が設置されている． 東海地震以外の地震についても，推進本部の調整，関係機関と大学が協力の下，地震予知に関わる様々な手法が模索され，予知手法開発への努力が続けられてきたが，突発的に発生する地震の予知を行えるレベルにはまだ達していないのが現状である．

1995年1月17日に起きた兵庫県南部地震は，6432人という多数の尊い犠牲者を出すと共に都市機能に壊滅的な被害をもたらし，地震国日本における震災対策の重要性を改めて知らしめる大災害となった．これを踏まえ，地震による災害から国民の生命，身体そして財産を保護することを目的とした地震防災対策特別措置法が1995年7月に施行されている．地震予知に関しても国民的な関心の高まりをも反映し，地震に関する調査研究を推進するため，地震予知推進本部を発展的に解消し，同法ではその規程に従って新たに総理府に地震調査研究推進本部が設置されることとなった（なお2001年1月からは，文部科学省に移管）．これらの体勢の上に活断層の評価といった長期的な対応を含め，地震予知の実現に向けた一層の取り組みが推進されている．地震予知研究に関するこれまでの経緯・成果は力武（2001）に詳しい．

さて，兵庫県南部地震は，地震予知に関して，特に活断層という概念と地球電磁気的手法による地震予知に脚光を与えることとなった．このうち地球電磁気的手法に関しては，ギリシャでの成功が伝えられていたVAN法の流れの上に様々な可能性が議論されることとなり，VAN法の推進に取り組んできた上田誠也教授のグループの研究は世間から大きく関心を持たれた．

地球電磁気的手法による地震予知は古くから関心を持たれていた項目の一つであり，電磁波からDCまで幅広い周波数の現象について報告がある．（力武,1986,2001;Johnston,1987,1997;Park et al.,1993）．気象庁地磁気観測所では古くからこの問題に取り組み，地震に伴う地磁気や地電流の変動現象の解明に努めてきた（例えば，吉松,1933;Yanagihara and Nagano,1976;Mori,1987）．

地震に伴う地磁気変化に関して，当所は地震予知計画に参加しているが，この計画では主に地殻活動に伴う応力変化を反映したピエゾ磁気効果（Stacy,1964）を念頭において，関係諸機関の協力により，プロトン磁力計による29点の観測網が構築さ

れ，全磁力永年変化精密観測を行っている．全磁力とは地磁気ベクトルの絶対値のことであるが，プロトン磁力計の登場によりこれを安定して高精度に捕らえることが可能になり，観測網の構築が可能となった．地磁気は地震活動の他，地球内部の外核での流体鉄の運動や磁気圏・電離層電流などにより活発な変動を続けている．地震予知のためには，これらの変動の中から特に地震活動に伴う信号を抽出･特定することがその基本となるが，地震活動に伴い期待される信号は微弱であり，特に日本では人工ノイズが極めて大きいこともあり，困難を伴っている．この問題を克服すべく様々な試みが鋭意続けられているのが現状である．

また，地磁気3成分の観測値における地震に関連した変動についても，Yanagihara and Nagano（1976）は，地磁気観測所本所（柿岡）の鉛直方向の成分と他の水平方向の2成分との関係に関東大地震前に特徴的な変化が見られたと報告した．このような手法による予知研究は，理化学研究所などで引き続き検証されている．

一方，地震と関連した地電流 （直接地電流を観測するのは困難であり，実際には2地点間の電圧を計測していることから正確には地電位差というべきであろうが，この名称が広く用いられている） の観測も，当所では古くから精力的に実施された（吉松,1937,1938,1943,1984）．しかし，地電流には地震以外の変動が常時含まれる上に，電極の性能や降雨等の環境変化のため安定した観測が難しく，また観測場所附近の局所性に著しく左右されて変化が複雑なこと，電極間隔を大きくとらないとS/N比を上げることができないこと等のため，地震予知の面からは中々見るべき成果を上げることができなかった（例えば，柳原,横内,1967）．その後，Mori（1987）は地電流に含まれる地震以外の原因による変動の性質解明とそれらの除去，安定した高精度観測の実現につとめ，海に近い観測点には磁気圏・電離層電流による変動に加えて海流によるダイナモ効果の影響が見られること，標準観測点の磁場データを使って広域的な変動の大部分を簡易に取り除けることなどを示した．Mori（1987）が考案したNTTの電話回線とアース電極を利用した長基線（10kmオーダー）の地電流により，1987年から水戸付近を広域的にカバーするS/N比の良いデータがとれるようになり，BAYTAP-Gを解析に適用することで，標準点の磁場と相関する成分，Sq・潮汐成分，長周期トレンド成分，異常値の分離が可能となった（Ozima et al., 1989）．そこで水戸からほぼ150～200km以内に起きたマグニチュード6以上の9個の地震と対比が行われたりしたが，地震と対応するような異常変化は見られていない．なお，NTT長基線を利用した観測は，東京大学地震研究所を中心としたネットワークMT観測等に応用され，広域的な電気伝導度構造解析において成果が上げられており（例えばUyeshima,1990;Uyesima et al.,2001），地震予知のための基礎となることが期待されている．

兵庫県南部地震およびその余震に関連しては地電位差異常が観測されたという報告がいくつか出され（大志万,1995;Electromagnetic Research Group for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, 1997；Honkura et al., 1996a, b），これに関連してVAN法が国民からも関心を集めることとなった．

VAN法は，専門家の中では議論の大きい手法であるが，地震予知に向けた国民の強い要望の中で，その可能性に関しては前向きに取組むことが必要であるとの判断から，気象庁としてもVAN法の成果に目を向け，活用の可能性を探るべく，ギリシャに専門家を派遣することとし，1995年3月14～23日，地震火山部地震予知情報課の伊藤秀美調査官（当時），地磁気観測所技術課の山本哲也主任研究官（当時）をギリシャ・アテネに派遣し，VAN法開発者のリーダーであるVarotsos氏に会い，VAN法の状況について視察させた．

１．２　VAN法について

以下両者の報告を元に，VAN法を巡る現状を要約する．

VANという名前は開発者（Varotsos, Alexopoulos, Nomikos）の頭文字を取って名付けられたものである．複数の地点で地電流観測を行い，地震前兆現象として出現する特有のシグナル（Seismo-Electric Signal -SES-）を捉えて地震予知を行うというものである （Varotsos and Alexopoulos,1984a,b）．

観測されるSESは，

1）　継続時間数分から数時間の現象
2）　観測点に固有の場所（必ずしも距離が近いとは限らない）を震源とする地震に関連
3）　地震の数日～数週間前に出現
4）　その大きさは対応する地震のマグニチュードに比例
5）　磁場変動を伴わない

といった性質を有しており，何地点かのSESの観測により地震の震源地やマグニチュードを地震発生前に推定し事前に地震を予知することができるとされている．

SESは場所によって出現したりしなかったりするため，地点選定に際してあらかじめ地質学者からのアドバイスを受け，地質境界や活断層付近をねらって試験的な観測を先行して行うことが必要であり，また，ノイズレベルが低い（1mV/100m以下）という条件が課せられる．

試験観測では，多数の電極を設置し，周辺に地震活動がおこるまで観測を続ける．地震活動があったにもかかわらずSESのみられなかった場合は，SESが検出される点にあたるまで試験観測を繰り返す．SESが観測されるのは10点のうち1点程度であるという．

本観測は，ノイズ除去のため一つの方向につき短基線（50～200m）と長基線（数km）の2本を組みにし，東西方向と南北方向の地電流観測を最少のセットとして実施される．1995年頃からは，一部の観測点で，観測エリアを空間的に拡張しつつ，短基線60チャンネル以上，長基線10チャンネル以上の電場観測に加え地磁気3成分観測，広帯域地震計による観測が同時に行われている（メガステーションと称されている）．観測点数（2001年2月現在）は7点で，そのうち4点はメガステーション，2点は従来型の小規模のもの，残る1点はそれらの中間規模のものである（長尾，私信）．

これらのデータは，アテネ大学の固体地球物理研究所にテレメータされ，ペンレコーダで記録される．昼夜を問わず常時監視されているが，特別の処理は行われない．各観測点からの数チャンネルのデータを，参照データとなる他の観測点の1-2チャンネルの記録とともに，折りたたみ記録紙上に並べて記録し，目視でノイズかSESかの判別を行う．ノイズとして想定されているのは，

1） 地面と電極の接触電位差の変動によるノイズ
2） 地磁気変化により誘導された地電流
3） 工場，高圧線，電車などさまざまな原因の人工的なノイズ

の3種類である．これらのうち1）は多数の基線に同時にあらわれることはない　2）はすべての観測点で同時にみられることや地磁気変化の観測との対応がつく　3）は各短基線における基線長あたりの電位差の値が長さの異なる短基線で同一でない　ことなどから識別できる．

記録紙上に残された変化の大部分は1），2），3）にあてはまるノイズであって，異常変化がSESとみなされることはきわめてまれである．数あるノイズの中からSESを判別するのはVarotsos教授の個人的な認識力による部分が大きい．近年デジタルデータ収録も行われており，パソコンを利用したSESの自動認識の試みなどより高度な処理も取り組まれているが，実用化にはいたっていない．

VAN法がうまく機能するためには，1）SESのソース，2）伝播経路，3）検出できる場所の3要素が重要である．これら3要素の中には現在のところ確立されていない部分もかなりある．

このうち1）については，Varotsos教授のグループは，室内実験の結果を元にしたモデルを想定した．室内における岩石（または，それに類するサンプル）の圧縮実験によれば，岩石のストレスが増大してゆく過程で，応力場中の格子欠陥を含む鉱物の圧電効果により岩石の破壊以前のある限界ストレスで岩石に電流が流れるという現象が確認されたとした．しかし，この説にはいくつかの欠点が指摘されている（例えば，歌田,1990;Utada,1993）．日本の上田教授のグループは，岩石中の水の移動によって生じる流動電位（Ishido and Mizutani,1981;石戸,1995）に注目している．

2），3）については，SESが震源から離れた特定の観測点で検出されるには，それを可能にする特殊な構造（経路）が必要となる．VANグループやその賛同者の一部は，現在の技術では検出不可能な特殊な地下構造を想定すれば伝播の問題が解決されると考えているようである．検出不可能であるかもしれないにせよ，SESがよく出現する観測点付近の電気伝導度構造の研究はほとんど行われておらず，議論が進んでいなかった．しかし，最近，いくつかの構造探査が行われ，著しい電場変動の偏向などが報告された（例えば，Uyesima et al.,1998;Kanda et al.,2000）．

VANによる地震予知研究は1980年頃から開始され，地震に先行する異常変化（SES）について一定の成果を上げたとし（Varotsos and Alexopoulos, 1984a, b），その結果を踏まえ，1985年頃から，SESが観測され地震発生が予測された場合に，ギリシャ政府当局に知らせるようにしている．1994年10月にはVAN法研究のため，アテネ大学の中に固体地球物理研究所が設立された．ここでは，室内実験研究，理論的研究，観測研究等基礎部門のほか，VAN法で行っているデータを集約して計算機処理をするシステムがある．

VAN法の予知がどの程度成功しているかは，成功率（=成功予知数/予知数）・警告率（成功予知数/地震数）等の統計手法，定義によって多少異なるが，いずれもほぼ60%程度と報告されている（上田,1991）．予報精度は，半径100km以下，Mについては±0.7以下で，地震発生は前兆検知後数時間から1カ月程度（長尾,2001）である．

このように，実際に地震前に地震を予告している事例がいくつかあることは確かであるが，この方法が世界的に広く認められているとは限らず，むしろ批判的な科学者が多い（Geller, 1996），VAN法についての論争は，Lighthill（1996）に詳しくまとめられている．これまでの議論の多くは，VAN法のメカニズムではなく，VAN法で予知した事例についての統計的扱いに関する批判や予知イベントの地域的偏り等についてのものである．これはVAN法の手法自体が経験則に基づく現象論的・実験的手法であり，まだメカニズムをきちんと議論できる段階に到っていないからとも言える．VANの予知が当たったかどうかという問題については，まだ結論が出たとは言えない．

日本では東京大学地震研究所・上田誠也教授（当時）のグループがギリシャにおける成果に注目し，日本でもVAN法の観測を行うべく，1980年代から観測・研究を開始した．彼等は日本電信電話会社（NTT）の協力を得て，全国長基線観測を行い，北海道弟子屈，伊豆大島での成果を報告した（Uyesima et al.,1989;Kawase et al.,1993）．また，Nagao et al.（1996）はVANグループが観測した3,000を越える異常変化を独立に解析し，34個のSESを抽出した．そのうち14個はVANグループの出したものと一致したことが報告されている．1996に始まった科学技術庁の「地震総合フロンティア研究」では，理化学研究所が「地震国際フロンティア研究」を分担し，電磁気的手法による地震予知の研究の一環として中部日本を中心として全国規模でVAN法を適用した地電流観測網を整備した．この中でいくつかの地震に先行する前兆的な異常変化の観測が報告されている（上田,長尾,1994;長尾,2001）．しかし，これらの観測成果に対する解釈には異論も多く（例えば，小嶋,1991,1992），まだ地震予知に実用できる段階に達しているとは言い難いようである．

1．3　淡路島における地電流等観測

VAN法の学問的な基盤については議論のあるところであり，またその実態も現状ではギリシャの地震特性に依存する部分が大きく，この手法をそのまま日本の地震活動の監視業務に導入することは問題が大きい．例えばVAN法においては電極設置位置の選定が本質的な課題であるが，そのノウハウはきわめて曖昧であり試行錯誤で決めてゆくしかない．特にギリシャと日本の地殻構造は大きく異なり，日本で試みる為には0からのスタートを覚悟しなくてはならない．また日本では，ギリシャの場合と比べて桁違いにノイズが大きく，VAN法の基準のひとつであるノイズレベルの制限を守ろうとすると，電極は必然的に大がかりなものとならざるを得ない．このような大規模な施設を設置し，SES出現の有無を待って次々と設置し直して行くことを，何の成果の実績もなくいきなり稠密な日本の国土の上で実施することは極めて困難である．

このためVAN法そのものを,そのまま取り入れて,その可能性を試みることは断念したが，VAN法の成果を視野に，科学的手法の上にその基礎的検証を試みることで，これまでの地球電磁気学的手法による地震予知のための観測･調査を発展させることが期待された．なおこの間の地磁気観測所における検討内容については小嶋他（1997）にまとめられている．

兵庫県南部地震の起こった淡路島に着目すると，今後しばらくはここで大地震が発生する可能性は低い．この意味で地震予知の実証試験を行うことは不可能である．しかしながら，この領域では地震発生後しばらくの間，かなりの余震活動が期待できる．したがってこの地域に高密度な観測網を敷くことで，地震活動に伴う地球電磁気的な信号を検出できる可能性が高い．これによりVAN法における地点選定という経験的な要素を包含した観測を行うことができるはずである．ここに地電流と地磁気を組み合わせた総合的な観測を行うことで，議論の多いVAN法の科学的基礎に関しても踏み込んだ検討を行うことが可能になる．

このような観点から当所では「活断層における地震予知技術開発のための地電流等観測施設の整備」の計画を立てたところ，幸い平成7年度第1次補正予算（1995年5月15日臨時閣議決定，19日成立）でこの計画が認めらた．この計画の骨子は，「地震活動に関連して発生する地球電磁気的な現象を検出するための観測手法を開発し，地震予知技術の向上に寄与することを目的として，地震活動を行っている活断層が存在する適地を選定し，地電流・地磁気による地震予知のための観測手法開発施設を整備する.」というものである．具体的には淡路島の複数の地点で地電流観測施設および地磁気3成分・全磁力観測装置を整備するものである．

一般的な地震予知のための地電流観測と言っても，VAN法をも包含した形での観測を念頭に島内にほぼ均一に多数の電極を配置し電場分布を求めるよう特に配慮している．

日本に於ける地球電磁気的な地震予知観測におい

ては,人工ノイズの除去が極めて重要な課題となる.淡路島も大阪･神戸という大都市圏の近傍で，極めて人工ノイズが大きい．しかし島内には最大のノイズ発生源である直流電車がないことが注目される.これらのノイズを外部擾乱として除去する可能性も着目された．このような手法が確立されば今後の国内における地震予知観測に大きく寄与することが期待される.

勿論，人工ノイズには直流電車によるものの他にも様々なものがある．このうち高圧送電線については，事前に高圧送電線ノイズの影響の及ぶ範囲について茨城県石岡市池袋地区および半の木において試験観測を行い（清水他,1995）参考にした.

地電流観測点の選定は，出来る限りノイズの少なそうなこと，近くにノイズ源となりうるようなものが存在しないこと，電話回線を敷設できること（特に基準点については,ISDN回線を敷設できること),全磁力観測点については，商用電力を使用できること，基準点，全磁力観測点については，道路や人家からある程度離れていること，磁場傾度が小さいこと等を考慮した.

以下，観測施設設置の経緯を参考のため簡単にまとめる.

平成7年7年5月の閣議決定を受けて，6月に，地元の自治体等に連絡，地点選定の実地調査並びにNTTとの打ち合わせを行い，地磁気･地電流調査観測を経て候補地の地権者に連絡し借地内諾を得た.即ち地電流観測点21地点，全磁力観測点6地点，3成分観測点1地点（一部重するところがある）の選定を行った．地点選定を行う一方で整備する装置とその取り付け調整について仕様書を作成する作業にかかった．7-9月にかけて，ネットワークMTグループ等からの情報収集やNTTとの折衝を行った．また,淡路島における観測点の土地借用手続きのため地権者および自治体との調整も並行して行った.

10月11日に官報に入札公示され,12月15日に開札,明星電気が一括して落札し，契約を行った．平成8年1月8-12日に，現地観測点において電極設置位置を業者に指示し，2月9日には電極埋設工事が全て終了した．また，地磁気観測装置については，2月13日，明星電気守谷工場で中間検査を実施した．2月19-23日，所長・総務課長が現地視察，自治体挨拶を行う．3月11-15日，現地での完成検査．このようなかなりタイトなスケジュールを経て，4月1日から漸くデータ収録を開始することができた．以後この観測は平成13年3月31日まで続けられた.

1．4　観測施設

1．4．1　観測点の配置

地電流観測点および全磁力観測点の配置については，ノイズ影響が少ないこと，NTT回線が敷設可能であること等，また兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）を引き起こした野島断層がある淡路島北部から中部地域の範囲内にほぼ均一になるように検討し，観測点のうち数点は可能な限り野島断層付近に配置するように考慮した．さらに地磁気3成分観測点についてもノイズ影響が少ないこと等を条件に検討し，最終的には図1.4.1に示すように地電流観測点を21カ所，そのうちの6カ所に全磁力観測点を，そのうちの1カ所（大谷観測点）に地磁気3成分観測点を設置した．野島断層付近については，西側およびその延長線上に5個の観測点（No.1,4,5,8,11）を置いた.

1．4．2　観測システム

1．4．2．1　地電流観測

地面の中には微弱な電流（地電流）が流れているが，これを直接測定することは困難であるため，通常，地電流を測定するには地中に電極を埋めて，二つの電極の間の電位差を測定する方法が採られる.離れた2地点間の地電流を測定するには，2地点間の電極から測定装置まで導線を敷設する.

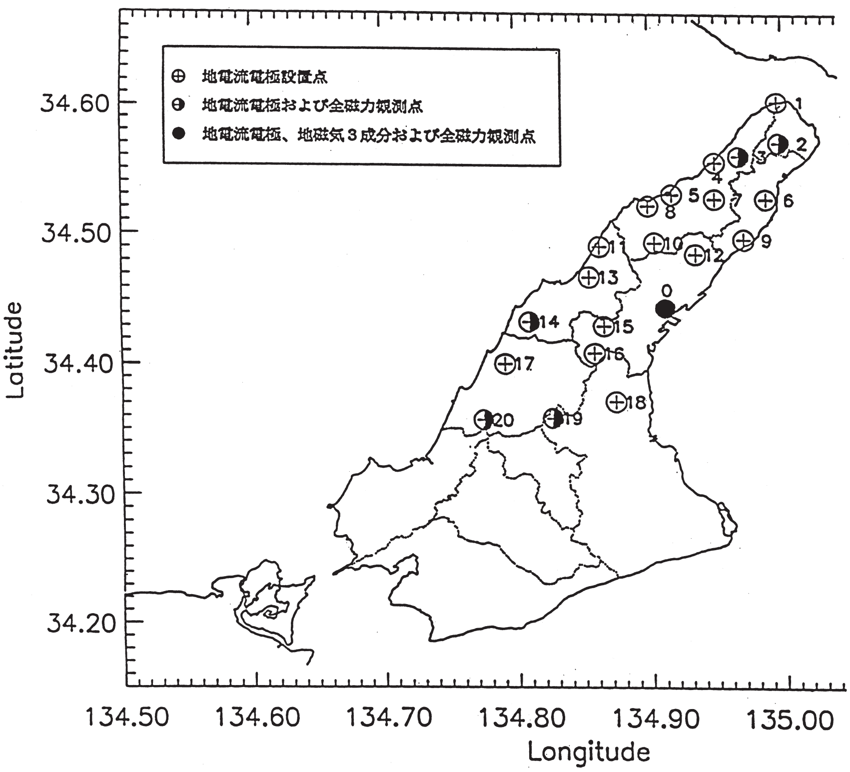
(A) 電位差の測定

淡路島における地電流観測では図1.4.1のように配置された地電流観測点（合計21点）のうち，地点番号0の大谷観測点の電極を基準電極として，その他の観測点との間の2地点間の電位差を大谷観測点に設置した地電流観測部により毎秒計測（GPS時計からの秒信号による）した.

・地電流観測部仕様

a. 計測範囲	±5V
b. 分解能	10 μV（20ビット）
c. 入力換算雑音	4 μV/RMS 以下
d. 温度ドリフト	10 μV/℃以下
e. 入力インピーダンス	10M Ω 以上
f. 計測チャンネル数	20ch（他に予備等として13ch）
g. フィルタリング	
・カットオフ周波数	0.5Hz
・1Hzでの減衰量	60dB以上
h. サンプリング周期	1sec，全チャンネル同時サンプル
i. 校正信号	±1V，（誤差±0.5%以下）

淡路島観測点



淡路島観測点リスト

地点番号	観測点名	観測項目	緯度 N(+34°)	経度 E(+134°)	高度 (m)
0	大谷	F,P,E	26'38.9"	54'42.8"	30~40
1	江崎	E	36'14.4"	59'48.3"	6
2	岩屋	P,E	34'17.3"	59'53.4"	200
3	城ノ瀬	P,E	33'38,9"	58'04.9"	280
4	野島	E	33'20.9"	56'59.0"	10
5	浅野	E	31'49.6"	55'01.8"	30
6	久留麻	E	31'37.6"	59'15.4"	40
7	仁井	E	31'37.1"	56'58.0"	195
8	育波	E	31'17.3"	53'57.7"	45
9	釜口	E	29'47.1"	58'15.6"	45
10	生田	E	29'37.1"	54'15.0"	175
11	尾崎	E	29'25.9"	51'47.6"	5
12	興隆寺	E	29'06.3"	56'04.9"	180
13	北山	E	28'03.3"	51'19.6"	20
14	草香	P,E	26'00.0"	48'38.8"	65
15	大町畑	E	25'47.4"	51'57.6"	50
16	木曽上畑	E	24'30.0"	51'31.7"	85
17	別所	E	24'00.7"	47'31.4"	35
18	中川原	E	22'17.1"	52'27.3"	58
19	奥畑	P,E	21'31.1"	49'38.7"	210
20	鳥飼浦	P,E	21'25.9"	46'33.3"	60

F:３成分観測点，　P:全磁力観測点，　E:地電流電極設置点

図1.4.1　淡路島観測点および観測点リスト（田中他,1997）.

（B）地電流電極

地電流電極としては，これまでの地磁気観測所での地電流観測における経験から銅板電極を採用した．1枚の寸法は900×900×1.5mmで，これを4枚ずつ30cm間隔で深さ3m（最下部まで）に埋設した．大谷観測点では，接地抵抗等の特性試験の結果から4枚の電極のうち，最も安定した1枚を選び淡路島における地電流観測の基準電極とした．また大谷観測点以外の観測点については同様の特性試験の結果から，より安定した2枚（内1枚は予備）を選びNTT専用回線（1回線は2本の導線がペアとなっている）と各々接続した．なお使用している電極の状態が不安定になった場合には各観測点の「切替箱」により他の電極に切り替えることができる（図1.4.2参照）.

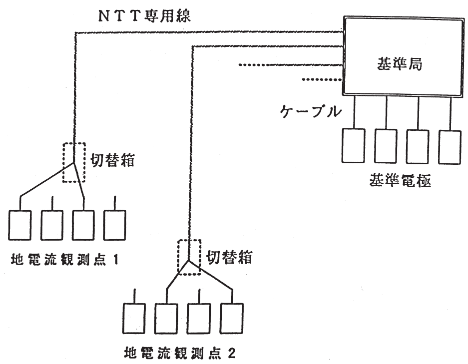


図1.4.2　地電流電極接続図.

（C）電位差測定用導線の敷設について

大谷観測点で電位差を測定するためには，淡路島内の他観測点から測定用導線を数kmにもわたり大谷観測点まで敷設しなくてはならないが，NTT（現NTT西日本）の協力により，全区間をメタリック構成としたNTT専用線を利用することができた.

1．4．2．2　全磁力観測

地電流観測点（21点）のうち6地点においてはプロトン磁力計により全磁力を毎分計測（GPS時計からの分信号による）している．全磁力とは，ベクトル量である地球磁場の大きさ（絶対値）のことであり，スカラー量である．またプロトン磁力計とは陽子（プロトン）の核磁気モーメントを利用し，その地球磁場中における自由歳差運動の周波数を測定して，全磁力を測定する装置である．しかしプロトン磁力計はプロトンの核磁気モーメント（定数）を基準にしているため，温度や湿度等の環境条件に左右されず，より正確な全磁力値を直接測定することができる．

全磁力観測点にはプロトン磁力計の他に，GPS時計，パソコン，モデム等が整備してあり，またこれ

らの装置から数十m離れた場所にプロトン磁力計検出器を高さ2.0mに設置している．毎分計測された全磁力値データはパソコンに収録されるとともに，プロトン磁力計本体に装備されているメモリカードにも記録される．なお，モデムはNTT一般加入回線を利用して収録データを伝送するためである．

(A) プロトン磁力計仕様

a. 検出器	トロイダル無指向性コイル（25mH，8Ω）	
b. 計測器	・計測範囲	42000～52000nT
	・分解能	0.1nT
	・観測精度	±0.2nT以内
	・確度	±0.5nT以内（器差）
	・制御時計	10Hz安定度 1μ/day
	・計測モード	マニュアル，10・30・60sec，外部トリガ

(B) GPS時計仕様

a. 機能	協定世界時対応（UTC），自動校正，閏年対応
b. 総合時刻精度	1msec以下

1．4．2．3　地磁気3成分観測

地磁気（磁場）は方向と大きさを持った，ベクトル量であるため，直交座標系における3つの成分(X,Y,Z)で記述することができる．磁場の成分を測定するためフラックスゲート磁力計を利用した．淡路島では地磁気3成分観測を大谷観測点のみで実施しており，GPS時計からの秒信号により毎秒計測している．また今回利用した磁力計の同型の装置は既に地磁気3成分観測において十分な運用実績がある．

フラックスゲート磁力計による磁場の観測には，磁力計の検出器（センサー）および本体（計測部）の温度変化が観測値に温度ドリフト（0.1～0.2nT/℃程度）として影響する．このドリフトがデータ解析時に問題になる場合には，検出器および本体部温度データを利用して地磁気3成分データに温度補正を行うか，あるいは温度ドリフトの影響が出ない程度に磁力計自体の温度管理をしなければならない．そこで磁力計の急激な温度変化を避けるため検出器を図1.4.3に示すような検出器収納庫に納め，さらに収納庫自体を地下に埋め，断熱材で覆った．これにより検出器温度の日変化を避けることができた．また磁力計本体は空調設備のある大谷観測点局舎内に設置したため年間を通じてほぼ一定の温度に保つことができた．

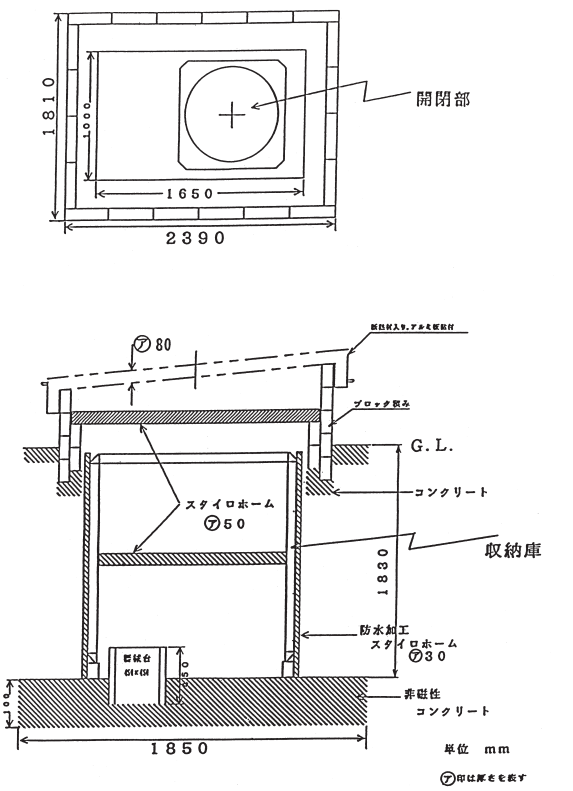


図1.4.3　フラックスゲート磁力計　検出器収納庫（明星電気株式会社,地電流等観測施設取扱説明書,1996）.

(A) フラックスゲート（型）磁力計について

このタイプの磁力計は強磁性材料の磁気的非線形性を利用した磁力計であり，非常に指向性が鋭いのが特徴である．また地球磁場のような弱い磁場を測定する場合には，磁力計に使用する強磁性材料（コア）として，特に高透磁率のものを利用する．

フラックスゲート磁力計のセンサーはコアに，一次および二次コイルが巻かれたものであり，一次コイルに交流を流すことによってコアを励磁し，外部の直流磁界によって生じる2次側の出力電流の変化から磁界を求めるのが一般的原理である．

淡路島での地磁気3成分の観測には，3本のコアを互いに直交させたタイプのセンサーを持つフラックスゲート磁力計を利用している．

(B) 地磁気3成分観測部（フラックスゲート磁力計）仕様

1.センサー部

a. 測定成分	X,Y,Zの3成分
b. 測定軸（コア）直交度	各軸相互間6′以内
c. 温度ドリフト	0.2nT/℃

2.計測部

a. 計測範囲　±500nT
b. 分解能　0.01nT
c. 出力ノイズレベル　±0.05nT以内
d. 感度の誤差　±0.5%以内
e. 定磁界補償
・印加軸　X,Y,Z
・設定範囲　±50000nT
・安定性　±0.1nT/day以内
・温度ﾄﾞﾘﾌﾄ　0.1nT/℃以下
f. 校正信号　±100nT
（誤差±0.5%以内）

1．4．2．4　観測データ伝送

1.4.2.1～3において計測された地電流・全磁力・地磁気3成分各々の観測データは全てGPS時計からの秒（全磁力は分）信号を計測トリガに使用しているため観測データ相互間の時間のズレはGPS時計の時刻精度（1msec以下）以内である．これらの観測データファイル（オリジナル）は全て一旦，大谷観測点に集められた後，一日に一度NTTのISDN回線により地磁気観測所（柿岡）側に転送される．以上のデータの流れをまとめると図1.4.4の様になる．

1．5　観測データ

1．5．1　データフォーマット

大谷観測点に集信されたオリジナルデータファイルは各種計測器から出力された生のデータであり，物理量ではない．このデータは柿岡側に転送された後，物理量に変換されると共に，毎秒値・毎分値に編集される．

以下にオリジナルデータファイルと編集済ファイルの種類について記す．

・オリジナルデータファイル（1日分）
地電流データ　：毎秒値（37ファイル）
全磁力　〃　：毎分値（6　〃　）
地磁気3成分　〃　：毎秒値（3　〃　）

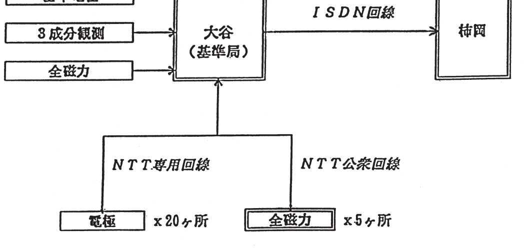


図1.4.4　観測データ伝送（小嶋,1996）.

・編集済ファイル（物理量）
地電流データ（mV単位）：毎秒値，毎分値
全磁力　〃　（nT単位）：毎分値
地磁気3成分〃（nT単位）：毎秒値，毎分値

なお，これら変換後のデータファイルフォーマットを付録Aに示した．また観測開始（1996年4月）から終了（2001年3月末）までの各観測点における地電流・全磁力・地磁気3成分データの収録状況はデータカタログ（付録B）を参照．

1．5．2　観測データ例

(A) 地電流データ

図1.5.1～図1.5.4に地電流（全20観測点）の毎秒値データのサンプルを示す．図1.5.1，図1.5.2のプロット期間は2000年11月1日～30日までの1ヶ月間であり，横軸1目盛は1日，縦軸目盛単位はmVである．また図1.5.3，図1.5.4は2000年11月1日の1日分のプロットであり，横軸1目盛は3時間，縦軸目盛単位はmVである．プロットの表示時刻は協定世界時（UT）である．なおデータは単位長当たりの値（mV/km）でないため，観測点間でその大きさを直接比較・検討はできないが，全ての観測点のデータは絶えず大きく変化（数100mV～1V程度）している．

1ヶ月分のプロット（図1.5.1，図1.5.2）では観測点間に大きさの違いはあるが，1日周期で同じような変化パターンを繰り返していることが分かる．そこで1日分のデータを表示したのが図1.5.3，図1.5.4である．これらを見ると明らかに全ての観測点において18時（UT）を挟む数時間の地電流変化がその他の時間帯と比較して小さくなっているが，この傾向は1年を通して(正確にはある特定の1日を除いて)同じである．なお，18時（UT）は日本時間では深夜3時に相当する．この時間帯は，ちょうど淡路島対岸の本州側の電車（JR，阪急，阪神等）が運行していない（あるいは運行本数が極めて少ない）時間帯とほぼ一致する．このことから日中の大きな地電流変化のうちの大部分は，電車軌道からの漏洩電流によるノイズの可能性がある．このことは，また次の例からも裏付けられる．毎年12月31日（大晦日）には電鉄会社各社は通常とは異なるスケジュールで運転される（24時間運行等）．したがって日中データの大きな変化が電車からのノイズによるとするならば12月31日の地電流データ変化は他の日と異なるはずである．図1.5.5，図1.5.6に2000年12月31日分のデータ（日本時間では2000年12月31日午前09時～2001年1月1日午前09時）を示した．これを見ると明らかに18時（UT）前後の数時間の地電流データの変化の幅が，他の日のそれとは異なって，それほど

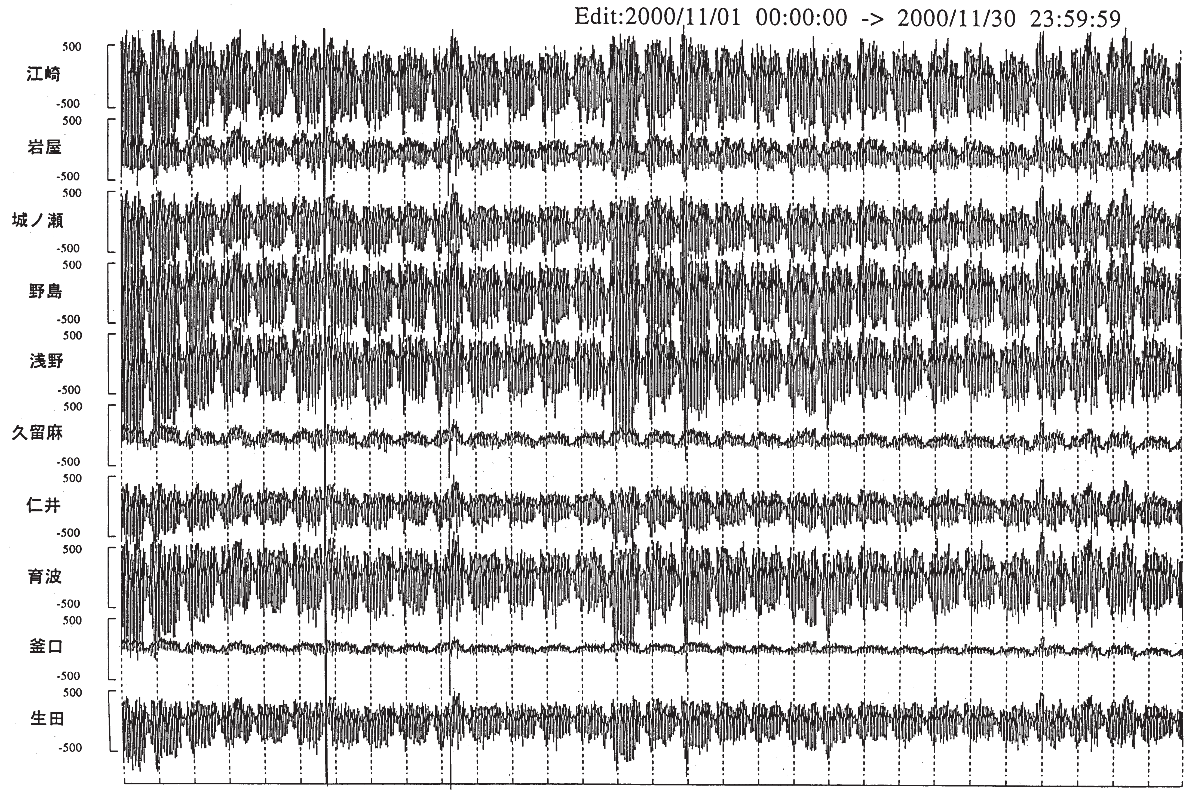


図1.5.1 地電流データサンプル（1ヶ月分）．大谷観測点を基準とした各観測点の地電流（電位差）データ．横軸1目盛は1日，縦軸目盛単位はmV．表示期間：2000年11月1日～30日（UT）．

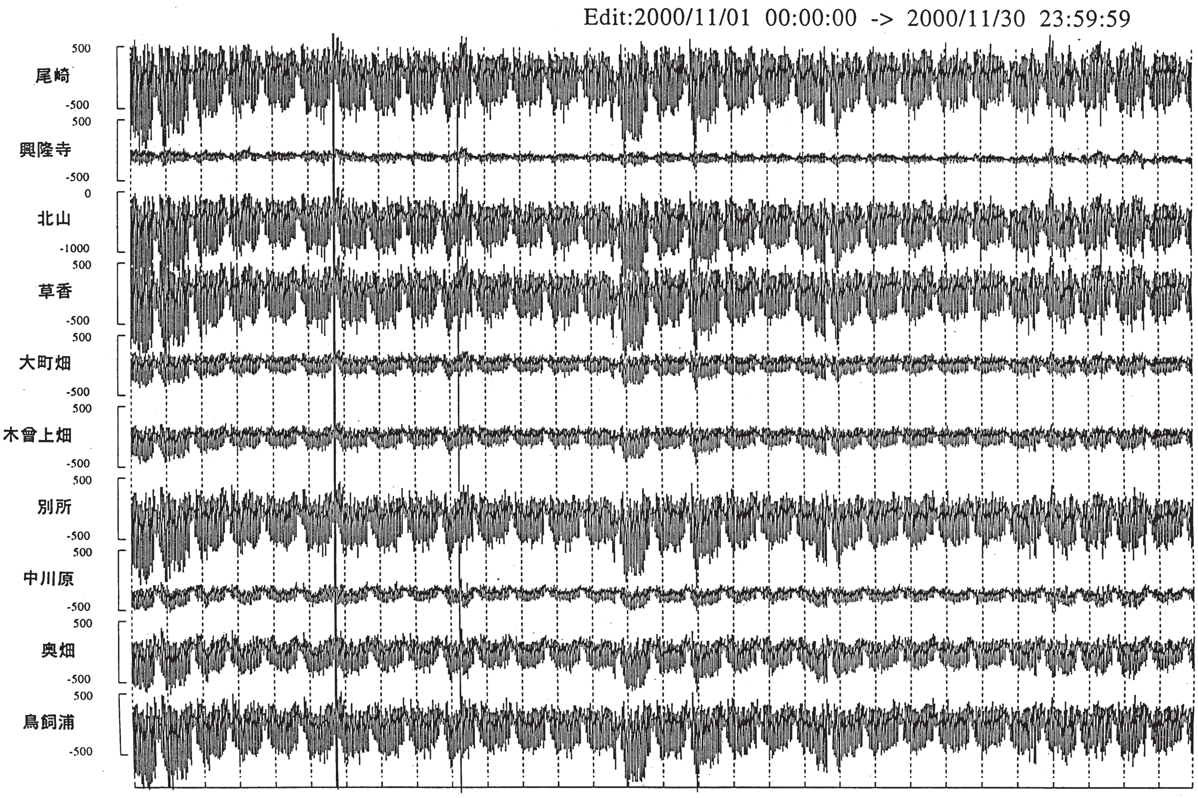


図1.5.2 地電流データサンプル（1ヶ月分）．大谷観測点を基準とした各観測点の地電流（電位差）データ．横軸1目盛は1日，縦軸目盛単位はmV．表示期間：2000年11月1日～30日（UT）．

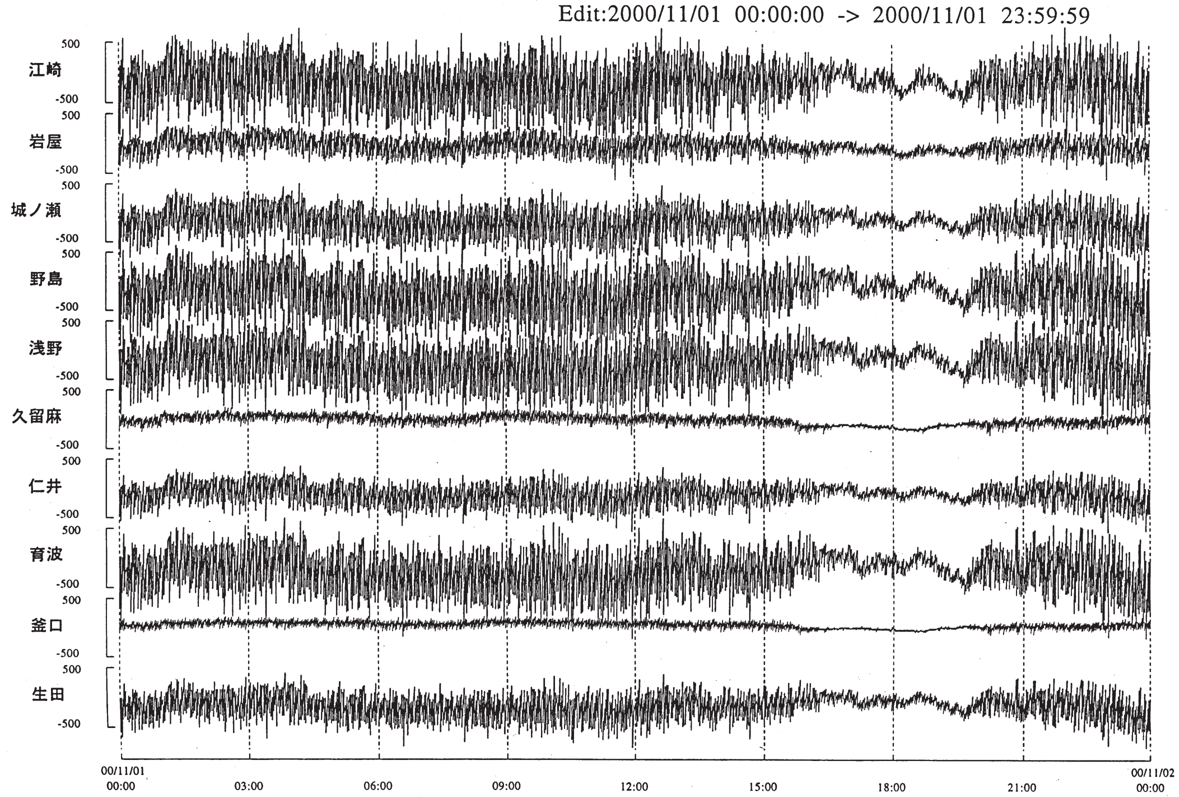


図1.5.3 地電流データサンプル（1日分）．大谷観測点を基準とした各観測点の地電流（電位差）データ．横軸1目盛は1日，縦軸目盛単位はmV．表示日：2000年11月1日（UT）．

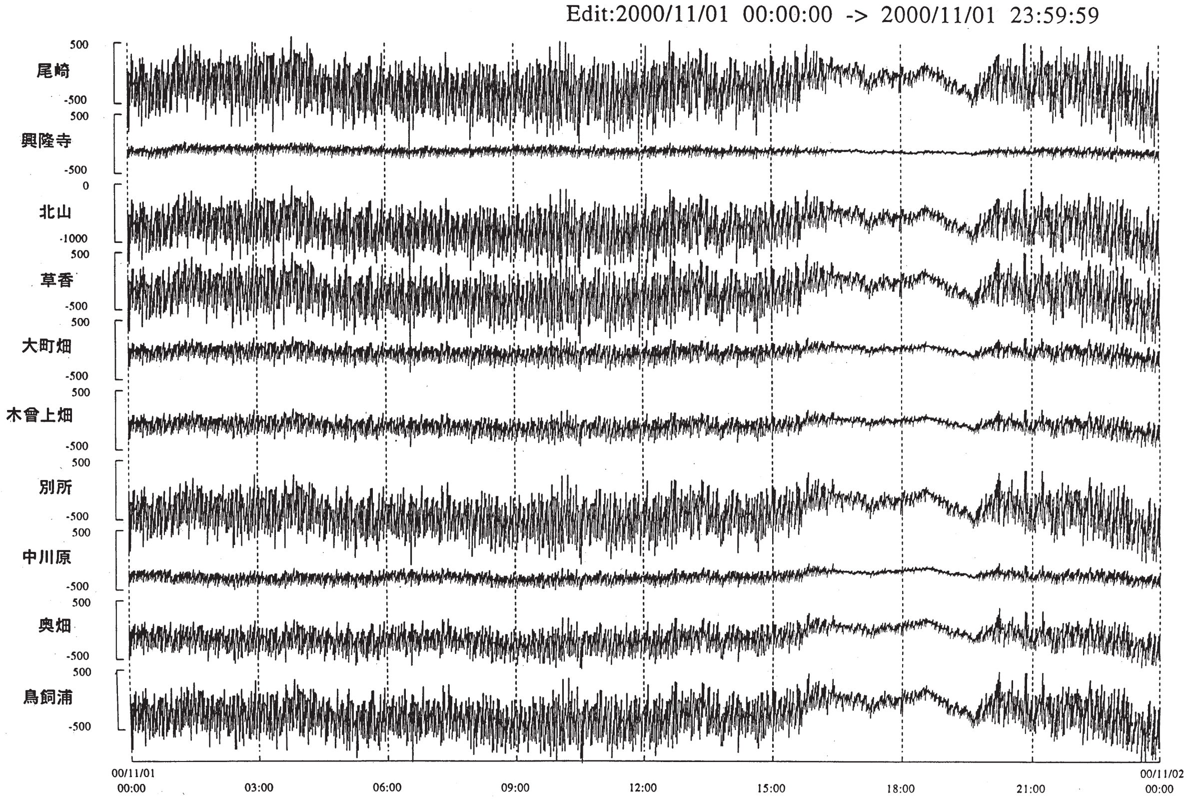


図1.5.4 地電流データサンプル（1日分）．大谷観測点を基準とした各観測点の地電流（電位差）データ．横軸1目盛は1日，縦軸目盛単位はmV．表示日：2000年11月1日（UT）．

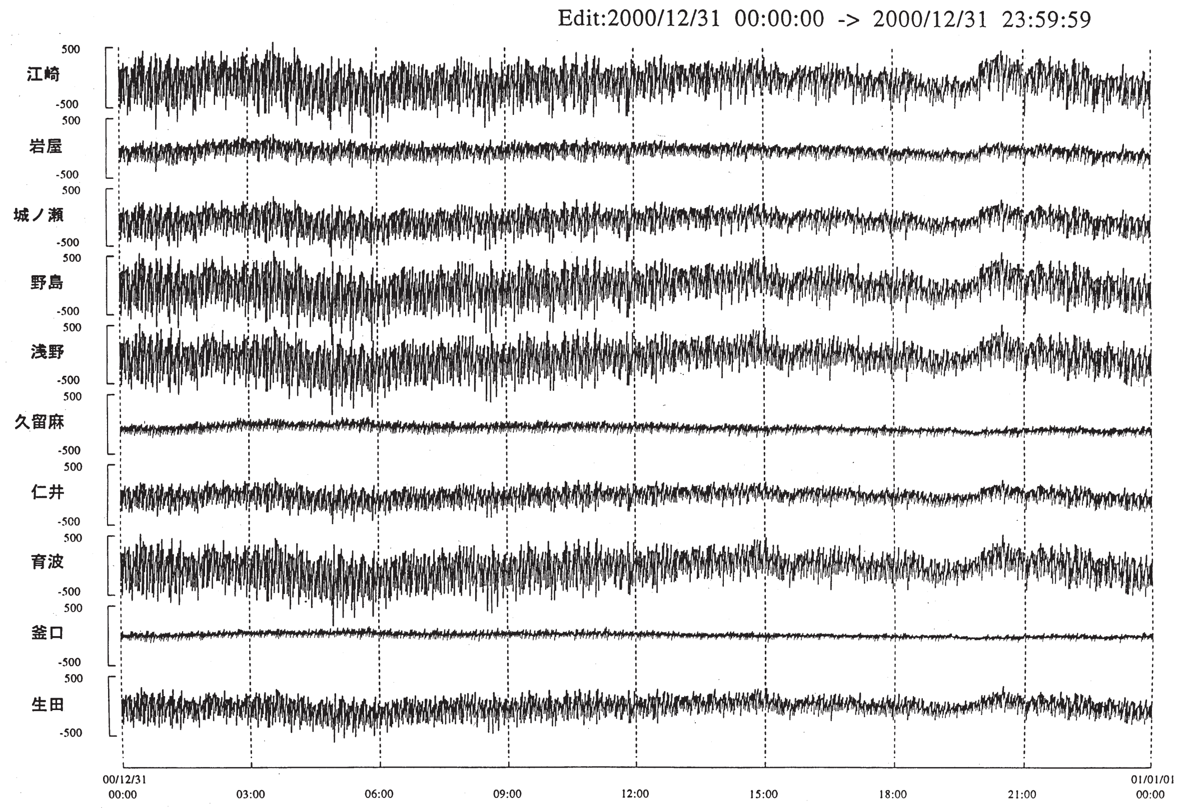


図1.5.5　2000年12月31日（UT）の地電流データ．大谷観測点を基準とした各観測点の地電流（電位差）データ．横軸1目盛は1日，縦軸目盛単位はmV.

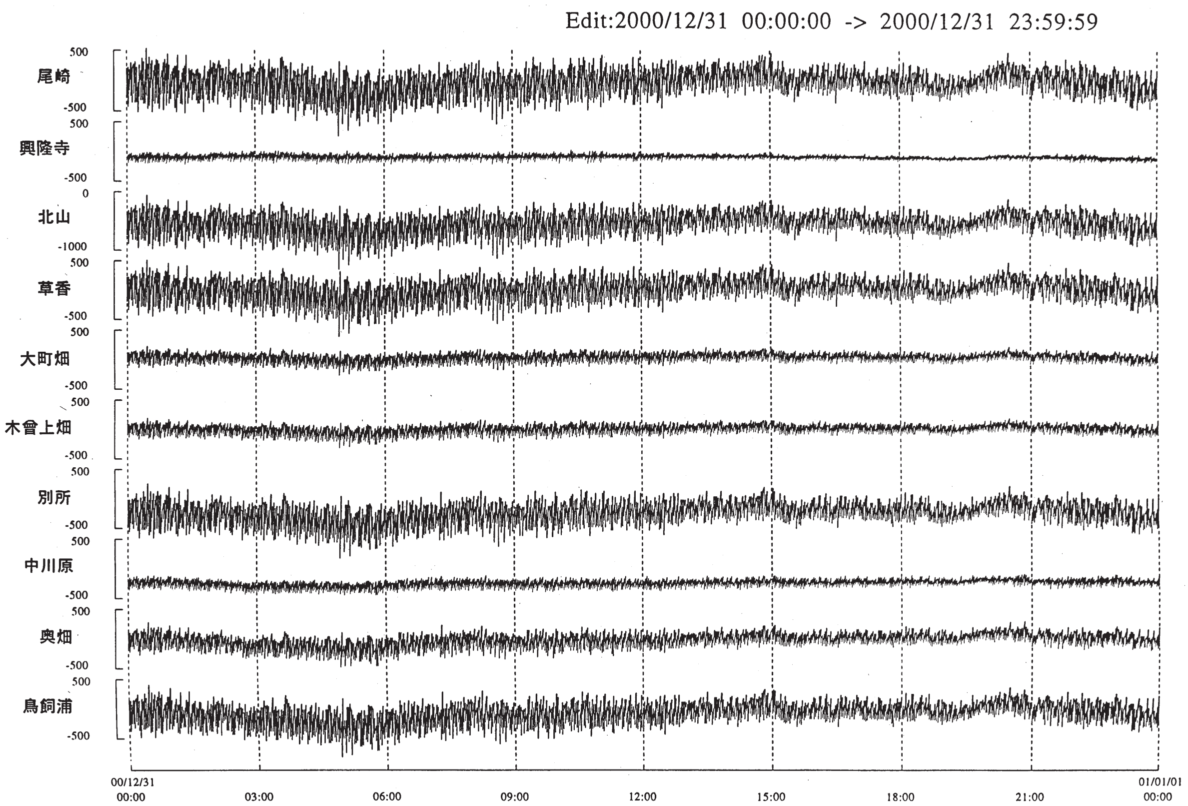


図1.5.6　2000年12月31日（UT）の地電流データ．大谷観測点を基準とした各観測点の地電流（電位差）データ．横軸1目盛は1日，縦軸目盛単位はmV.

小さくならない．これについては他の年の大晦日についても同様であった．したがって昼間のかなり大きな地電流データ変化の(全てとは言わないまでも)大部分は淡路島対岸の電車からのノイズの可能性が強いと考えられる．

各観測点において地電流データに混入しているノイズ（と思われる変化）は単位長当たりに換算すると，小さい観測点では数10mV/km程度，大きい観測点では100mV/km程度にも及ぶ．これだけのノイズが絶えず混入しているため，ノイズの除去手法の開発はこの観測の最も重要な目的のひとつであるが，そのノイズの大きさから極めて困難な課題であることも事実である．

(B) 1996年10月22日に発生した磁気嵐時の地磁気3成分・全磁力・地電流観測データ

図1.5.7～図1.5.9に1996年10月22日の磁気嵐発生時のデータを示した．図1.5.7のデータのうち上3本は地磁気3成分（X，Y，Z）の変化分の毎分値データ，残りの6本は全磁力データ（毎分値）で縦軸目盛単位は地磁気3成分・全磁力ともにnTである．横軸一目盛は3時間であり，時刻を世界協定時（UT）で表示している．地磁気3成分は毎秒計測しているが全磁力データが毎分値であるため，比較のため毎分平均値をプロットした．図1.5.8，図1.5.9には地電流データを示した．縦軸目盛単位はmV，横軸一目盛は3時間である．

図1.5.7の地磁気3成分・全磁力データから10月22日の09時過ぎから小さいながら磁気嵐が発生しており，細かな変化までも十分に読みとれる．この図の上から3番目のデータはZ成分だがX・Y成分と比較して少しノイズが大きい．図1.5.8，図1.5.9は同じ磁気嵐があった日の地電流データを示した．これらのプロットから地電流データは磁気嵐と対応した変化をしている．また16時頃から20時頃（UT）までは他の時間帯と比べればノイズが小さくなっているが，これは前述したように，おそらく淡路島の対岸にある電車の運行本数がこの時間帯には極端に少なくなるからであろうと考えられる．もちろんこの時間帯になれば家庭や工場から出る人工ノイズも小さくなるので一概にどれが原因であるとは言えないが，地電流データに混入するノイズの主な原因のひとつは電車によるものと考えてもほぼ間違いはないであろう．

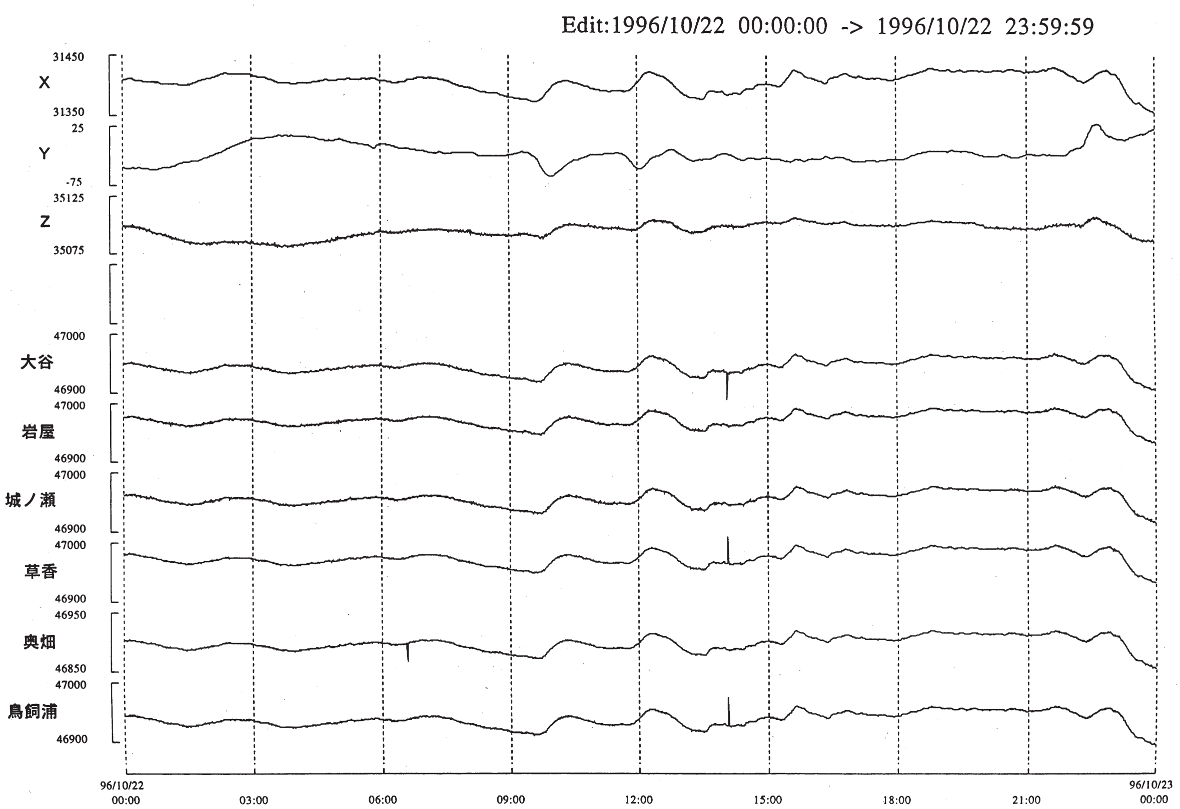


図1.5.7　1996年10月22日（磁気嵐発生時）の地磁気3成分および全磁力データ．上から3本は地磁気3成分（X,Y,Z：大谷），残り6本は全磁力データ．横軸1目盛は1時間，縦軸目盛単位は全てnT．

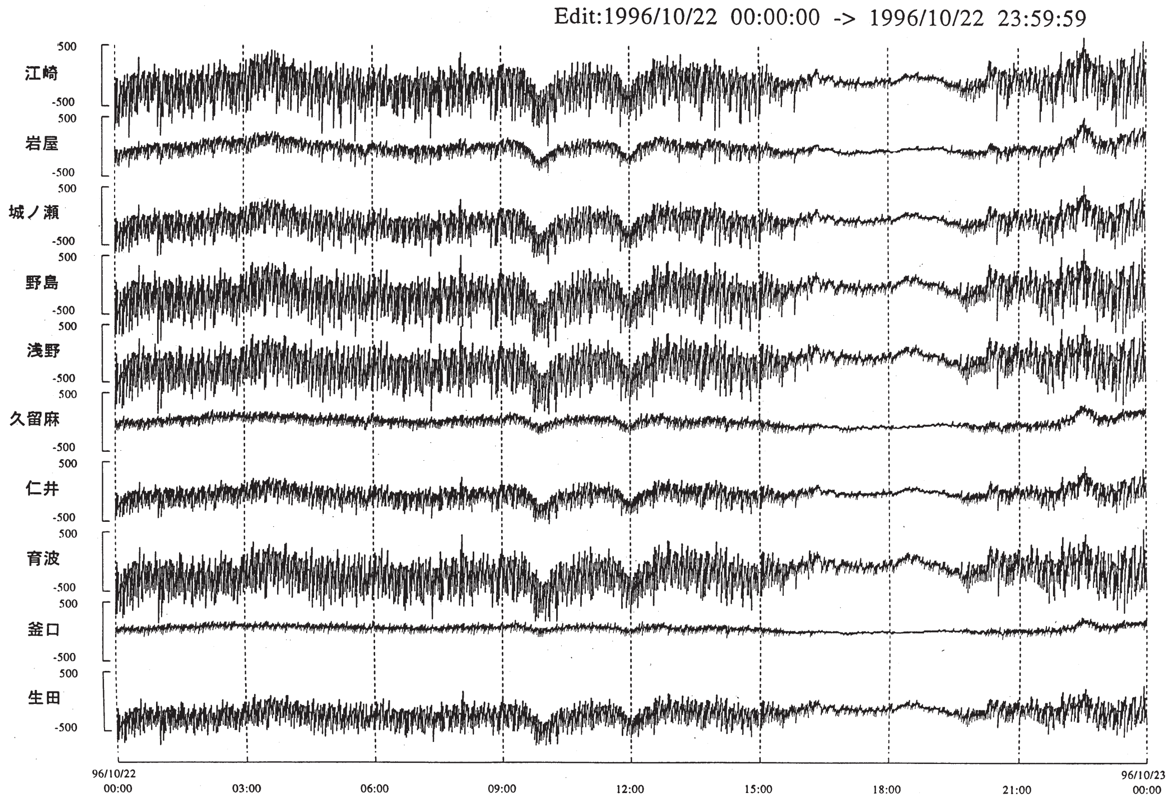


図1.5.8　1996年10月22日（磁気嵐発生時）の地電流データ（その1）．大谷観測点を基準とした各観測点の地電流（電位差）データ．横軸1目盛は1時間，縦軸目盛単位はmV．

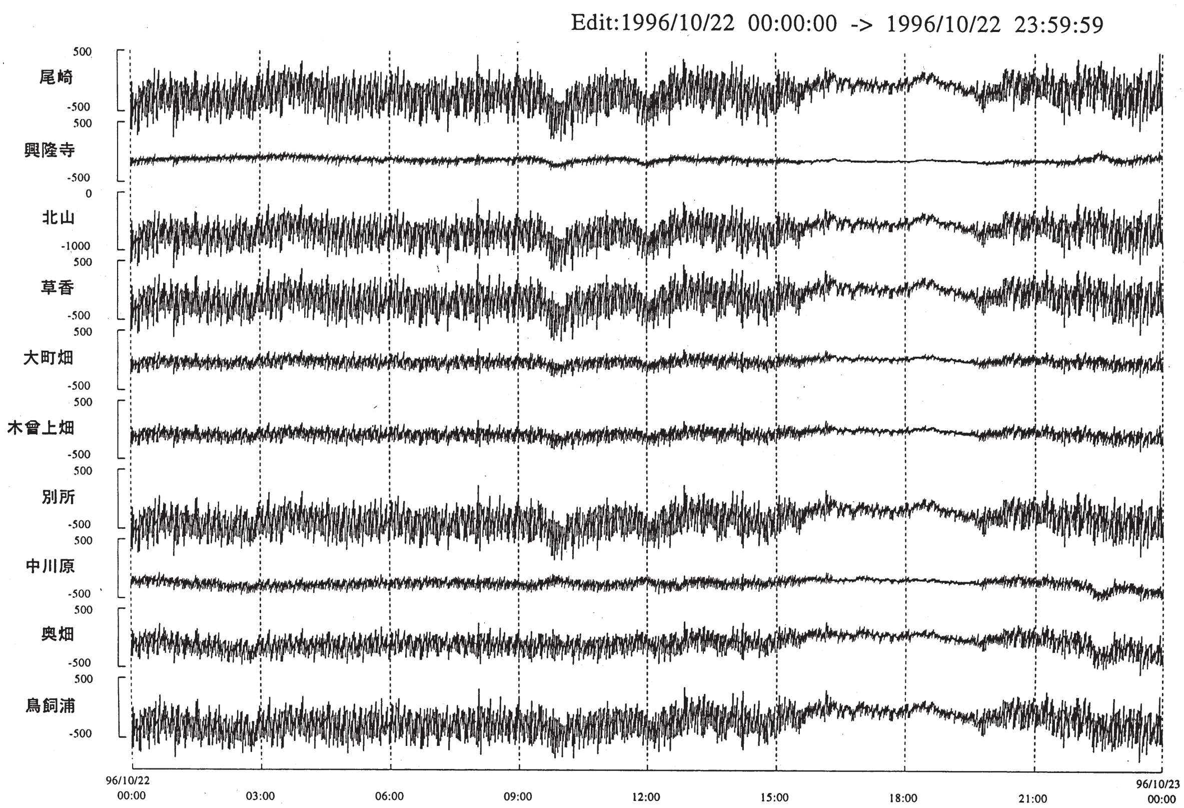


図1.5.9　1996年10月22日（磁気嵐発生時）の地電流データ（その2）．大谷観測点を基準とした各観測点の地電流（電位差）データ．横軸1目盛は1時間，縦軸目盛単位mV．

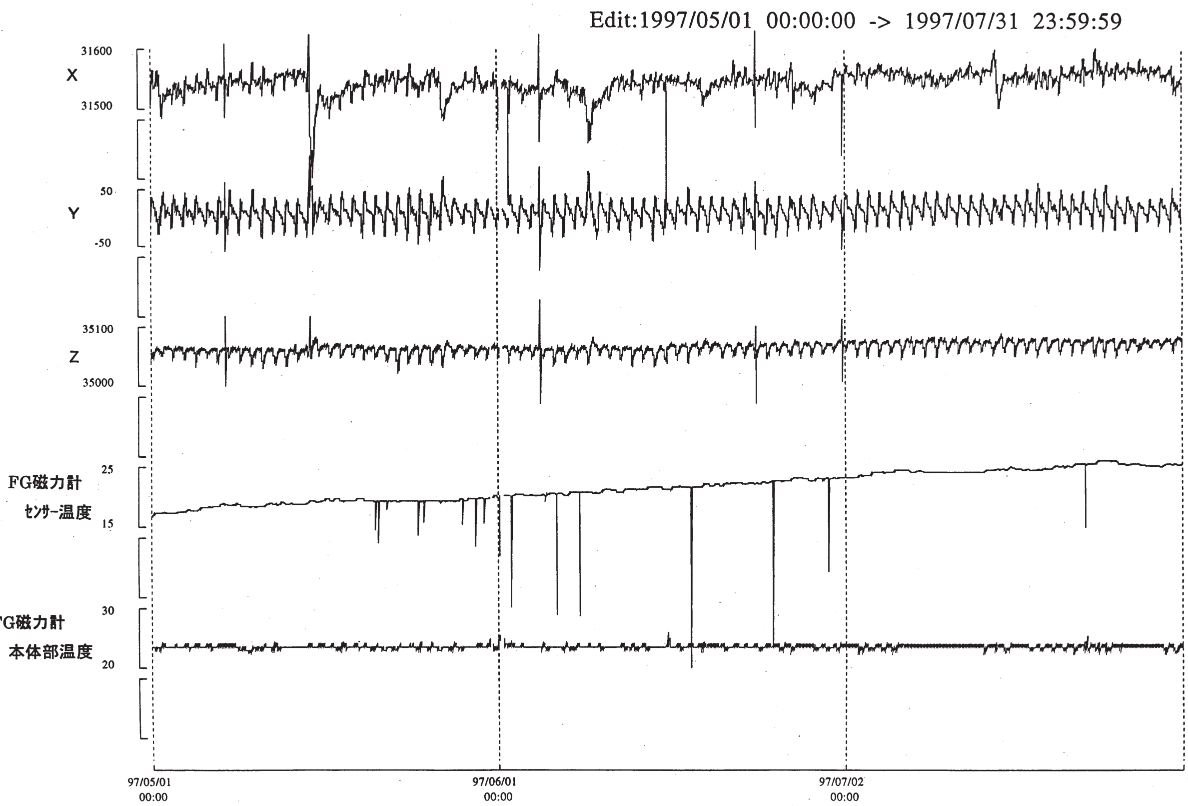


図1.5.10　地磁気3成分（X,Y,Z），フラックスゲート磁力計のセンサー・本体部温度データの長期（3ヶ月）変化サンプル．上から順に地磁気3成分（X,Y,Z）観測値（各成分の縦軸目盛単位はnT），フラックスゲート磁力計センサー・本体部温度（縦軸目盛単位は共に℃）．表示期間：1997年5月1日～7月31日（UT）．

図1.5.10に1997年5月から7月までの春から夏にかけて気温が次第に上昇する3カ月間の地磁気3成分（X，Y，Z），フラックスゲート磁力計のセンサー部・本体部温度をプロットした．縦軸目盛単位はnT（3成分），℃（温度）である．また横軸一目盛は30日である．センサー温度は3ヶ月間で約10℃上昇しているが大谷局舎内に設置してある本体部の温度は空調が効いているのでほぼ一定となっているため，この程度のスケールでは3成分データには温度変化によるトレンドは確認されない．

参考文献（第1章）

Electromagnetic Research Group for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Tectono electric signal related with the occurrence of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake （M7.2） and preliminary results of electromagnetic observation around the focal area, J. Phys. Earth, 45, 91-104, 1997.

Geller, R. J., Debate on "VAN", Geophys. Res. Lett., 23, 1291-1452, 1996.

Honkura, Y., H. Tsunakawa, and M. Matsushima, Variation of the electric potential in the vicinity of the Nojima fault during the activity of aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, J. Phys. Earth, 44, 397-403, 1996a.

Honkura, Y., H. Tsunakawa, and M. Matsushima, Behaviour of the electric potential during the activity of aftershocks of the M7.2 earthquake, Japan with special reference to SES of VAN, in A Critical Review of VAN, Ed. by J. Lighthill, World Scientific, Singapore, 303-313, 1996b.

石戸経士, 沸騰に伴なう界面導電現象—地震の電磁気的前兆現象のメカニズム—, CA研究会論文集, 100-105, 1995.

Ishido, T. and H. Mizutani, Experimental and theoretical basis of electrokinetic phenomena in rock-water systems and its applications to geophysics, J. Geophys. Res., 86, 1763-1775, 1981.

Johnston, M. J. S., Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity, Surveys in Geophysics, 18, 441-475, 1997.

Johnston, M. J. S., Tectonomagnetism and tectonoelectricity, Reviews of Geophysics, 25, 983-

988, 1987.

Kanda, W., M. Uyeshima and S. Uyeda, Electric field polarization around Ioannina VAN station, Greece, inferred from a resistivity mapping, Phys. Earth Planet. Interi., 119, 269, 2000.

Kawase, T., S. Uyeda, M. Uyeshima, and M. Kinoshita, Possible correlation between geoelectric potential change in Izu-Oshima Island and the earthquake swarm off the east Izu Peninsula, Japan, Tectonophysics, 224, 83-94, 1993.

Lighthill, J.（Ed）, A critical review of VAN , World Scientific , Singapore, 376pp, 1996.

明星電気株式会社, 地電流等観測施設取扱説明書, 1996.

Mori, T., Variations in the geoelectric field with relation to crustal conditions of the Earth, Geophys. Magazine, 42, 41-104, 1987.

Nagao, T., M. Uyeshima, and S. Uyeda, An independent check of VAN's criteria for signal recognition, Geophys. Res. Lett., 23, 1441-1444, 1996.

長尾年恭, 地震予知研究の新展開, 近未来社, 東京, 209pp, 2001.

大志万直人, 1995年兵庫県南部地震に関する電磁気変化, 月刊地球号外, 13, 164-174, 1995.

Ozima, M., T. Mori, and H. Takayama, Observation of earth-potential using telegraphic facilities and analysis with BAYTAP-G, J. Geomag. Geoelectr., 41, 945-962, 1989.

小嶋美都子, 伊豆大島で観測される地電位差異常変動の原因についての一考察, 地震, 44, 177-184, 1991.

小嶋美都子, 地震予知—地電流による可能性, 地震ジャーナル, 14, 20-28, 1992.

小嶋美都子, 淡路島における地電流等観測施設の整備, 気象,’96－5, 16－19, 1996.

小嶋美都子, 小池捷春, 徳本哲男, 菅原政志, 山田雄二, 大和田毅, 熊坂信之, 脇野洋一, 玉谷智佐, 清水幸弘, 淡路島における地磁気・地電流観測について（Ⅰ）—観測開始までの経緯—, 地磁気観測所技術報告, 37－1, 2, 123－132, 1997.

Park S. K., M. J. S. Johnston, T. R. Madden, F. D. Morgan, and H. F. Morrison, Electromagnetic precursors to earthquakes in the VLF band: A review of observations and mechanisms, Reviews of Geophysics, 31, 117-132, 1993.

力武常次, 乗富一雄, 藤田尚美, 水野浩雄, 山崎良雄, 木下肇, 浜野洋三, 本蔵義守, 地震予知Ⅱ　電磁気学的アプローチ, 学会誌刊行センター・学会出版センター, 186pp, 1980.

力武常次, 地震前兆現象　予知のためのデータ・ベース, 東京大学出版会, 232pp, 1986.

力武常次, 地震予知－発展と展望－, 日本専門図書出版, 620pp, 2001.

清水幸弘, 玉谷智佐, 熊坂信之, 大和田毅, 送電線による地磁気・地電流擾乱調査, 地磁気観測所技術報告, 35－1, 2, 15－18, 1995.

Stacey, F. D., The seismomagnetic effect, Pageoph, 58, 5-22, 1964.

田中智巳, 小嶋美都子, 小池捷春, 徳本哲男, 山田雄二, 菅原政志, 福井史雄, 大和田毅, 庄司哲也, 熊坂信之, 脇野定則, 玉屋智佐, 清水幸弘, 淡路島における地磁気・地電流観測について（Ⅱ）－観測の概要－, 地磁気観測所技術報告, 第104号, 37, 1997.

上田誠也, 地震予知に成功した国－ギリシャ－, 地震, 44, 391－405, 1991.

上田誠也, 長尾年恭, 地震予知：観測と基礎研究, そして“地電流”法, 地震予知シンポジウム, 7-15, 1994.

歌田久司, ギリシャの地震予知の物理, CA研究会論文集, 85-94, 1990.

Utada, H., On the physical background of the VAN earthquake prediction method, Tectonophysics, 224, 153-160, 1993.

Uyeshima, M., M. Kinoshita, H. Iino, and S. Uyeda, Earthquake prediction research by neans of telluric potential monitoring, Progress report No.2: Preliminary study on Teshikaga channel 2 signals and the seismicity in the region off Kushiro, Bull. Earthq. Res. Inst., 64, 487-515, 1989.

Uyeshima, M., Application of network MT method to the study of electrical conductivity structure in the crustal and eastern part of Hokkaido, Ph. D thesis, Univ. of Tokyo, 332pp., 1990.

Uyeshima, M., W. Kanda and Y. Kono, Directional properties of VAN's SES and ULF MT signals at Ioannina, Greece, Phys. Earth Planet. Interi., 105, 153, 1998.

Uyeshima, M., Utada, H., Nishida, Y., Network-magnetotelluric method and its first results in central and eastern Hokkaido, NE Japan, Geophys. J. Int., 146, 1-19, 2001.

Varotsos, P. and K. Alexopoulos, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, Ⅰ, Tectonophysics, 110, 73-98, 1984a.

Varotsos, P., and K. Alexopoulos, Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, II. Determination of epicenter and magnitude, Tectonophysics, 110, 99-125, 1984b.

Yanagihara, K., T. Nagano, Time change of transfer function in the central Japan anomaly of conductivity with special reference to earthquake occurrences, J. Geomag. Geoelectr., 28, 157-163, 1976.

柳原一夫, 横内恒雄, 地震に伴う地電流の異常, 地磁気観測所技術報告, 7, 53-58, 1967.

吉松隆三郎, 柿岡地磁気観測所に於ける地電流に就いて（其の一）, 気象集誌, 11, 433-444, 1933.

吉松隆三郎, 昭和11年12月27日伊豆新島強震及び同年10月26日安房野島沖顕著地震と地電流の変化について, 気象集誌, 15, 158－160, 1937.

吉松隆三郎, 昭和13年1月12日紀伊水道地震と地電位差の異常, 気象集誌, 16, 295－297, 1938.

吉松隆三郎, 昭和18年9月10日鳥取地震と地電位差の変化, 地磁気観測所要報, 7, 53－58, 1943.

吉松隆三郎, 昭和19年12月7日東南海地震と柿岡の地電位差の異常変化, 地磁気観測所要報, 20, 61－64, 1984.